

Influence of the microstructure dispersion on the tribological properties of composite bronzes reinforced with steel dendrites

B. A. Potekhin, Dr. Prof.¹, A.A. Hernandez Ferreira, Dr. Prof.², A. S Khristolyubov¹, A.V. Zhilyakov³, V.V. Iliushin¹

¹Universidad Estatal de Ingeniería Forestal de los Urales, Ekaterimburgo, Rusia. pba-nn@yandex.ru

²Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba. archdez@ucf.edu.cu

³Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract -- The possibility of creating composite bronze reinforced with martensitic and austenitic-ferritic stainless steel dendrites is considered. Compared to BrSn10 bronze, widely used in sliding friction pairs, BrFe12Ni7Al, BrFe12Ni7Cr5Si bronzes have a high complex of mechanical, technological and particularly tribological properties. For similar values of the coefficient of friction, the wear resistance of bronze BrFe12Ni7Al is a higher order. Unlike the classic bronze BrSn10, composite bronzes can be obtained in hot deformed state, deposited on steel and cast iron. The level of mechanical properties: $\sigma_{0.2} = 220$ MPa; $\sigma_B = 295$ MPa; $\psi = 38\%$ is 1.5 to 3 times higher than that of the BrSn10. At the laboratory level for the first time the possibility of creating an industrial variant of composite steel with a particularly high level of tribological properties is based.

Keywords – composite bronze, mechanical and tribological properties, martensitic steel, austenitic-ferritic stainless steel.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.295>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Influencia de la dispersión de la microestructura en las propiedades tribológicas de los broncees compuestos reforzados con dendritas de acero.

B. A. Potekhin, Dr. Prof.¹, A.A. Hernandez Ferreira, Dr. Prof.², A. S. Khristolyubov¹, A.V. Zhilyakov³, V.V. Iliushin¹

¹Universidad Estatal de Ingeniería Forestal de los Urales, Ekaterimburgo, Rusia. pba-nn@yandex.ru

²Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba. archdez@ucf.edu.cu

³Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia.

Resumen— Se considera la posibilidad de crear broncees compuestos reforzados con dendritas de aceros martensíticos y austenítico-ferríticos inoxidables. En comparación con el bronce BrSn10, ampliamente utilizado en pares de fricción por deslizamiento, los broncees BrFe12Ni7Al, BrFe12Ni7Cr5Si poseen un elevado complejo de propiedades mecánicas, tecnológicas y particularmente tribológicas. Para valores similares del coeficiente de fricción, la resistencia al desgaste del bronce BrFe12Ni7Al es, en un orden, más alta. A diferencia del bronce clásico BrSn10, los broncees compuestos pueden ser obtenidos en estado deformado en caliente mediante depósitos sobre acero y hierro fundido. El nivel de propiedades mecánicas: $\sigma_{0.2} = 220$ MPa; $\sigma_B = 295$ MPa; $\psi = 38$ % es de 1,5 a 3 veces superior que el del BrSn10. A nivel de laboratorio, por primera vez, está fundamentada la posibilidad de creación de una variante industrial de bronce compuesto con un nivel particularmente alto de propiedades tribológicas.

Palabras claves— bronce compuesto, propiedades mecánicas y tribológicas, acero martensítico, acero austenítico-ferrítico inoxidable

I. INTRODUCCIÓN

Los broncees en base a estaño tipo BrSn10 son bien recomendados en los pares de fricción por deslizamiento como aleaciones anti fricción. Sin embargo, la presencia en ellos de compuestos intermetálicos del tipo $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ no permite deformarlos, ni en caliente, ni en frío, lo cual restringe el campo de su aplicación racional [1]. La soldadura y los depósitos restauradores son muy difíciles de lograr ya que los compuestos intermetálicos frágiles a todas las temperaturas de su existencia, tienen una forma desfavorable de finas agujas.

La plasticidad tecnológica del bronce BrSn10 se puede hacer satisfactoria disolviendo y transfiriendo los compuestos intermetálicos gruesos y quebradizos a una solución sólida α (Cu-Sn). Esto viola la regla de Charpy-Bochvar (para las aleaciones antifricción) y el bronce pierde completamente sus propiedades de servicio, o sea, las propiedades tribológicas.

Los intentos de mejorar la morfología de los intermetálicos con la aleación complementaria del bronce BrSn10 con Ni y Co no dieron resultados positivos y se decidió sustituir los compuestos intermetálicos $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ por dendritas de acero, cuya formación en la aleación binaria Cu-Fe es conocida [2-6].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los lingotes de los broncees experimentales con diámetro 65 mm y altura 120 mm (peso aproximado de 3 kg) fueron

preparados mediante la fusión de materias primas puras en un horno de fundición Tamman en crisoles de alúmina y en atmósfera reductora de monóxido de carbono.

Posteriormente fueron preparadas, por fundición al vacío, varillas de 7 mm de diámetro, cuya velocidad de cristalización y enfriamiento era cercana a los 700 °C/s. Además, algunas piezas fundidas de los broncees investigados fueron refundidas con electrodos de tungsteno en atmósfera de argón a una profundidad de 5 mm.

La composición química de los broncees experimentales aparece en la tabla I.

TABLA I.
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS BRONCEES INVESTIGADOS,
% EN PESO

Nº	Bronce	Fe	Ni	Al	Sn	Co	Cr	Si
1	BrFe12Ni7Al	12.9	6.0	1.0	-	-	-	-
2	BrFe14Ni7Sn3Al	14.2	7.0	1.0	2.5	-	-	-
3	BrFe9Ni4Co1Al	8.6	3.9	0.8	-	1.1	-	-
4	BrFe18Ni8Co2Al	17.2	7.7	1.0	-	2.0	-	-
5	BrFe23Ni8Co3Al	22.9	8.2	1.0	-	2.8	-	-
6	BrFe12Ni7Cr5Si	12.4	7.5	-	-	-	4.0	1.2

Notas: 1) el resto Cu; 2) la cantidad de impurezas no rebasa 0,30%, S y P \leq 0,02 % ambos.

El análisis químico local se realizó en el microscopio de rastreo Jeol JSM 6490-LV con la instalación para microanálisis Oxford Inca Dry Cool (resolución 133 eV). El análisis químico general se determinó en áreas de 1 mm², como el valor promedio de tres o más mediciones

El tratamiento térmico de las muestras investigadas se llevó a cabo en el horno de cámara SNOL 8.2/1100, cuyas desviaciones de la temperatura dada no excedía $\pm 5^\circ\text{C}$.

La cantidad de dendritas por su área relativa en las superficies de las secciones metalográficas de las muestras se determinó por el método contenido en [7].

La micro dureza de los componentes estructurales de las aleaciones fundidas y tratadas térmicamente se midió en los equipos PMT-3M y 402MVD con cargas de 0,5N.

Las características mecánicas de las aleaciones se determinaron durante la tracción de 5 muestras estándar con diámetro de 5 mm en la zona de trabajo a temperatura ambiente en la máquina de ensayo Instron 3382.

El coeficiente de fricción y la intensidad de desgaste se determinaron en una instalación especial montada sobre la base de una máquina herramienta con mando numérico (CNC). El ensayo se llevó a cabo según el esquema disco-muestras en

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.295>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

forma de dedos con registro computarizado continuo de los parámetros del ensayo (presión, velocidad de deslizamiento, temperatura). En cada experimento se usaron tres muestras de dimensiones 6x6x12 mm y como contra cuerpo un disco de acero del tipo usado para cojinetes de bolas y de rodillos IIX15 (0,95-1,05% C, 1,30-1,65% Cr) con dureza de 45 HRc. El método de ensayo está descrito en detalle en el trabajo [8].

Para la modelación de la influencia del lubricante en la formación del micro relieve en el proceso de fricción se empleó la interacción por cavitación en agua sobre la superficie de los bronce BrSn10 y BrFeNiCrSi 12-7-5-1 durante 1-5 minutos a la frecuencia de 20 kHz y potencia de 500 W.

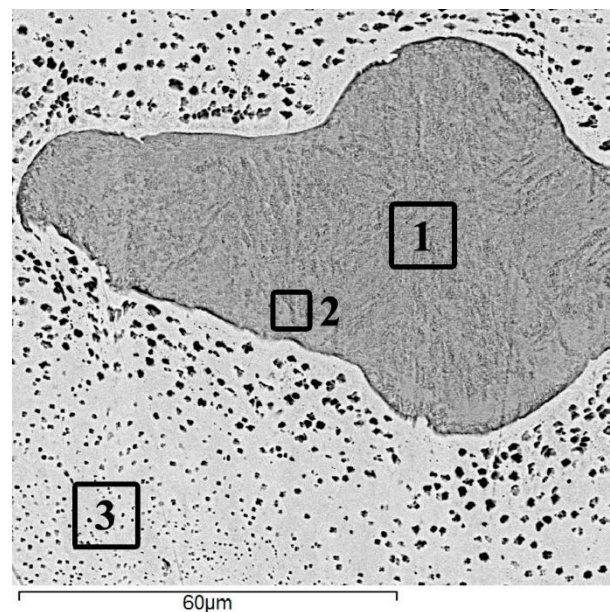
Los parámetros del micro relieve se investigaron en el interferómetro óptico modelo WYKO NT1100, que permite con una precisión hasta los nanómetros determinar el relieve tridimensional de la superficie, realizando la medición de la rugosidad de la misma.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

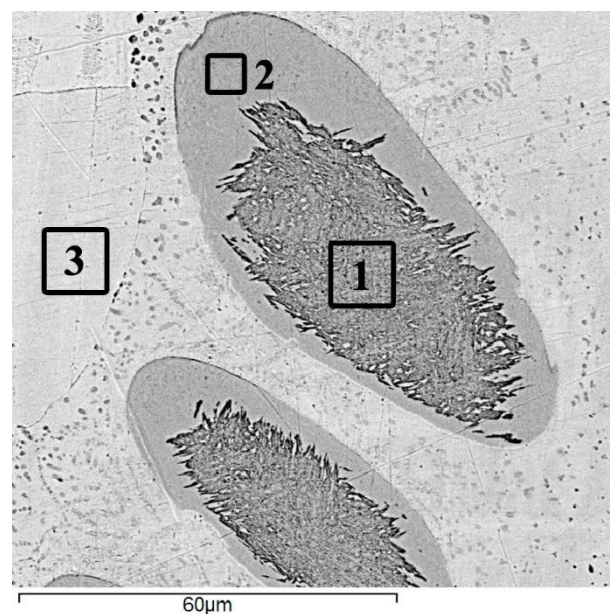
Los bronce estudiados pueden tener 2 tipos de macroestructura en dependencia del contenido total de Fe, Ni y Co en los mismos. Si la suma Σ (Fe, Ni, Co) no supera el 25% (Tabla I posiciones 1, 2), entonces las dendritas en la matriz de cobre están dispuestas de forma caótica, pero si Σ (Fe, Ni, Co) supera el 30% (como en el BrFe23Ni8Co3Al), entonces las dendritas ya formadas en la masa fundida forman un esqueleto rígido regular (Fig. 1, a, b).

Con el enfriamiento posterior del lingote en el estado sólido, los procesos de transferencia de masa en el sistema matriz-dendrita están determinados por la baja solubilidad del Fe y el Co en la matriz de cobre, que es una solución sólida de sustitución de Ni, Sn, Al en cobre. La solubilidad del hierro en cobre a temperaturas de 950; 800 y 600 ° C es 1,92; 1.02 y 0.05% en peso. respectivamente [9].

La composición química del componente de hierro de la dendrita para los bronce No. 2 y No. 3 (Tabla I) corresponde con la de los aceros Ni20Al y Ni16Co9Al. La estructura del lingote (Fig. 1, c) ilustra la presencia de dendritas rodeadas por una matriz (la parte clara) en la que se observan inclusiones uniformemente dispersas con un tamaño de 0.2–1.5 μ m que tienen una composición cercana a la de la dendrita. Estas se forman en el proceso de enfriamiento lento del lingote (la solubilidad del Fe en Cu disminuye) y se difunden en la dirección de las dendritas. Después del tratamiento térmico completo, la matriz se libera principalmente de estas inclusiones y solo cerca de las dendritas estas partículas forman una "estructura similar a la perlita" (Fig. 1, d, e) mientras que en el cuerpo de la dendrita se observan capas aisladas claras enriquecidas en Cu y Ni, de composición química cercana a la de la matriz.



(a)



(b)

Fig. 2. Estructura de la dendrita en el bronce BrFe14Ni7Sn3Al: a) lingote sin tratamiento térmico; b) luego de temple desde 950 °C con 0,5 hora de mantenimiento y posterior envejecimiento a 450 °C durante 2 horas

La Figura 2 ilustra el aspecto brillante de la formación de la dendrita en el bronce en el proceso de endurecimiento por precipitación a la temperatura de 450 ° C durante 2 horas.

En estado fundido, la dendrita resulta ser martensita de composición Fe + 20% Ni, que tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (bcc). El temple desde 950 ° C con un tiempo de mantenimiento de 0.5 horas conduce a la disolución de la parte exterior de la dendrita. Luego de un envejecimiento posterior a 450 ° C durante 2 horas a pesar de

la pequeña (<0.05%) solubilidad de Fe en Cu, estas partículas de Fe disueltas "se precipitan" en la superficie de esta misma dendrita, formando una cáscara de grosor de 3-5 μm .

La composición química de esta capa es similar a la de una solución sólida de sustitución de Ni (17.6%) y Cu (19.7%) en hierro (ver Tabla II). No se observan inclusiones en esta capa, y la solubilidad del Cu en Fe es insignificante. Por lo visto, en nuestro caso, en la cáscara, se forman nanoclusters (Fe - Cu - Ni), un fenómeno similar ya anteriormente observado [10-11].

De esta manera, después de un tratamiento térmico completo, la parte central de la dendrita se convierte en martensítica (bcc), la cáscara es ferrítica (bcc) y la matriz se libera prácticamente de las inclusiones de hierro, quedando solo las zonas "similares a la perlita" a una distancia de 3 μm de la superficie de la dendrita (Fig. 1, e).

TABLA II
REDISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN
ENTRE LAS DENDRITAS Y LA MATRIZ EN EL PROCESO DE
TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS BRONCES BrFe14Ni7Sn3Al

Régimen de tratamiento térmico	Zona en la Fig. 2	Contenido medio de elementos químicos, % peso.				
		Cu	Fe	Ni	Sn	Al
Lingote sin tratamiento térmico	1	20,35	64,09	14,84	-	0,72
	2	21,67	59,83	17,15	0,36	0,99
	3	91,61	1,33	2,77	3,48	0,81
Luego de temple y envejecimiento	1	19,76	65,03	14,50	-	0,71
	2	19,67	61,77	17,61	-	0,95
	3	89,13	2,79	3,79	3,46	0,82

En otros bronce compuestos (tipo BrFe23Ni8Co3Al), la estructura interna de las dendritas tiene una estructura diferente (ver Fig. 3, a). En el cuerpo de las dendritas, se forman zonas ricas en cobre de forma similar a una placa, con una sección transversal de 0.2 μm . Durante el proceso de temple desde 950 °C y posterior envejecimiento a 450 °C, estas zonas se vuelven globulares (ver Fig. 3, b, c).

Las dendritas de todos los bronce tienen una dureza suficientemente alta (ver Tabla III) ya en el lingote, debido a que durante la cristalización se forman los compuestos intermetálicos quebradizos FeAl, Cu31Sn8.

TABLA III
MICRO DUREZA HV⁵⁰ DE LAS DENDRITAS DE LOS BRONCES
BrFe12Ni7Al (a), BrFe14Ni7Sn3Al (b) y BrFe23Ni8Co3Al (c) EN
DEPENDENCIA DEL RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO.

	Régimen de tratamiento térmico	a	b	c
1	Lingote, sin tratamiento térmico	410	426	372
2	Temple desde 950 °C, con 1 hora de mantenimiento	203	384	371
3	Temple con posterior envejecimiento a 450 °C, durante 2 horas	335	461	511

Después del tratamiento térmico, estos compuestos se disuelven parcialmente y luego se forman otros: NiAl, (Ni, Co)

3Al, como ocurre en los aceros del tipo "maraging" [1]. La presencia de Co puede activar un alto grado de endurecimiento (columna c, tabla III).

El tamaño de las dendritas en los lingotes de 2 kg de peso alcanza 15-20 μm (Fig. 4, a, c). A alta velocidad de cristalización y enfriamiento de la fundición (700 °C/s) el tamaño de las dendritas disminuye en un orden. A diferencia de los compuestos intermetálicos tipo Cu₃₁Sn₈, las dendritas de acero tienen una forma satisfactoria conveniente, lo que, como regla, influye en las propiedades mecánicas y tecnológicas (Fig. 4, b, d).

La introducción en el bronce de cromo en cantidad de 5% (BrFeNiCrSi 12-7-5-1) transforma la dendrita en estado austenítico-ferrítico. La composición química de la dendrita y su matriz se presentan en la **tabla IV**. En este caso el Cr, que es un elemento ferritizador se disuelve en el Fe y la presencia de un 15% de Ni en la dendrita trabaja, por su esencia como austenitizador [12, 13].

TABLA IV
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA DENDRITA Y LA MATRIZ DEL
BRONCE BRFeNiCrSi 12-7-5-1 PARA DIFERENTES TIPOS DE
FUNDICIÓN.

Tipo de fundición	Región analizada	Contenido medio de elemento químico, % en peso				
		Cu	Fe	Ni	Cr	Si
fundición normal	dendrita	8,13	56,73	15,98	16,58	2,57
	matriz	94,81	1,31	3,39	0,29	0,20
fundición al vacío	dendrita	10,70	54,17	13,04	21,44	0,65
	matriz	89,47	3,22	5,13	1,02	1,16

De acuerdo con la regla Charpy-Bochvar [14] las aleaciones de deslizamiento deben incluir fases sólidas duras y matriz blanda. Un ejemplo claro de esto es el ampliamente empleado bronce BrSn10. En los bronce compuestos, reforzados con dendritas de aceros de diferentes clases, se analizó la influencia de la microestructura de las dendritas, su dispersión y micro dureza en las principales propiedades tribológicas. En la figura 5 aparecen las dependencias del coeficiente de fricción de la presión en la zona de contacto para los bronce experimentales y el BrSn10. Los valores de dichos coeficientes y de la intensidad de desgaste aparecen en la tabla V para diferentes microestructura y micro dureza de las dendritas.

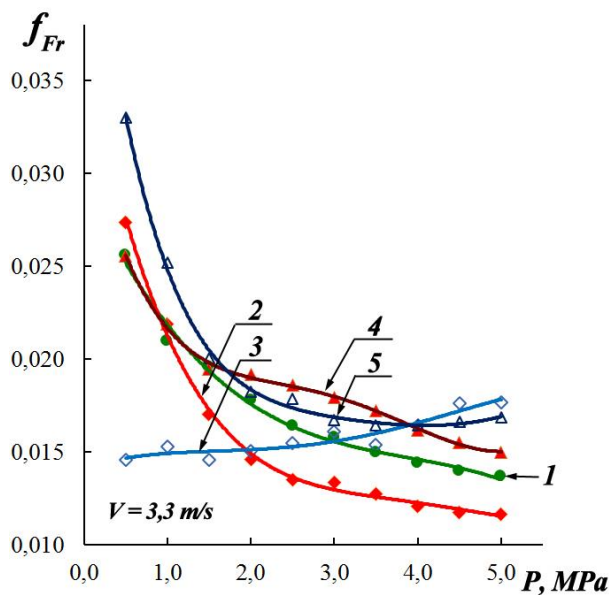


Fig. 5. Coeficiente de fricción de los bronce compuesto obtenidos por vaciado (curvas 2, 4) y succión al vacío (curvas 3, 5).
1 – BrSn10; 2, 3 – BrFeNiCrSi 12-7-5-1; 4, 5 – BrFeNiAl 12-7-1

El efecto del contenido total de elementos de aleación en las aleaciones de tipo BrFeNiCoAl en el estado del revestimiento se muestra en la Figura 6. En un trabajo anterior [15], los autores mostraron la posibilidad de modelar la estructura del revestimiento mediante la fundición al vacío, por lo que, la morfología de la fase dendrítica en estas aleaciones puede considerarse idéntica. Las características tribológicas de las aleaciones de tipo BrFeNiCoAl se presentan en la Figura 7 y en la Tabla V (posiciones 6, 7, 8). El alto desgaste de la aleación BrFe9Ni4Co1Al1 se explica por la pequeña cantidad de la fase dendrítica, que es la superficie de apoyo en las aleaciones antifricción, para soportar la carga del contra cuerpo durante la fricción, lo que aumenta el desgaste. En este sentido, no se debe realizar un revestimiento de recuperación con aleaciones de tipo BrFeNiCoAl con un bajo nivel de aleación inferior al 20%.

Los datos experimentales presentados en la **tabla IV** muestran que la dureza de la superficie de apoyo (dendritas de acero, intermetálicos en el BrSn10) no influye significativamente en el coeficiente de fricción el cual se encuentra en el intervalo 0,013-0,018, mientras que la resistencia al desgaste varía en amplios límites desde 0,001 hasta 0,025 $\mu\text{m}/\text{km}$.

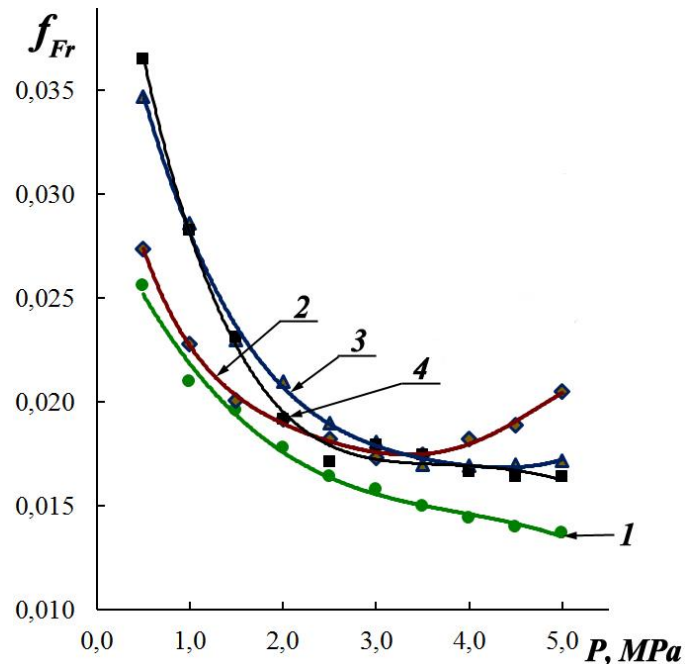


Fig. 7. Coeficiente de fricción de los bronce fundidos tipo BrFeNiCoAl: 1) BrSn10; 2) BrFe9Ni4Co1Al; 3) BrFe18Ni8Co2Al; 4) BrFe23Ni8Co3Al

Tabla V. Dependencia del coeficiente de fricción (f_{Fr}) y la intensidad de desgaste (I) y el cambio en la rugosidad (ΔRa) de los bronce investigados de la microestructura de las dendritas y su micro dureza.

Nº	Composición del bronce, fundido	Composición de la dendrita (superficie de apoyo)	Sección de la dendrita μm	HV ⁵⁰	f_{Fr} , con $P=3$ MPa, $v=3,3$ m/s	I , $\mu\text{m}/\text{km}$	ΔRa , μm
fundición convencional, velocidad de cristalización < 5 °C/s							
1	BrSn10	$\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$		401	0,016	0,025	0,04
2	BrFeNiAl 12-7-1	martensita endurecida por envejecimiento	20-100	338	0,018	0,026	0,24
3	BrFeNiCrSi 12-7-5-1	austenita inoxidable	20-30	189	0,013	0,006	0,12
fundición al vacío, velocidad de cristalización > 700 °C/s							
4	BrFeNiAl 12-7-1	martensita	2-5	< 200	0,017	0,002	
5	BrFeNiCrSi 12-7-5-1	austenita-ferrita inoxidable	5-10	< 200	0,016	0,001	
revestimiento, velocidad de cristalización > 700 °C/s							
6	BrFeNiCoAl 9-4-1-1	martensita endurecida por envejecimiento	2-5	< 200	0,017	0,035	
7	BrFeNiCoAl 18-8-2-1	martensita endurecida por envejecimiento	2-5	< 200	0,018	0,005	
8	BrFeNiCoAl 23-8-3-1	martensita endurecida por envejecimiento	2-5	< 200	0,018	0,004	

Al mismo tiempo, es precisamente la resistencia al desgaste la que determina la fiabilidad y durabilidad de los pares de fricción por deslizamiento.

En la figura 8 se muestra el aspecto de la topografía de la superficie del bronce BrFeNiCrSi 12-7-5-1 luego de ser sometida a la interacción por cavitación en agua con el propósito de modelar el proceso de formación del micro relieve producto de la interacción de la superficie de los bronce con el lubricante. Como se puede apreciar al comparar el patrón de colores de la superficie con el de la leyenda (a la derecha) sobre la misma prevalece una rugosidad relativamente alta. Allí también se muestran las dos direcciones a través de las cuales se midió la rugosidad de la superficie cuyos perfiles aparecen en la figura 9 para las direcciones X e Y respectivamente.

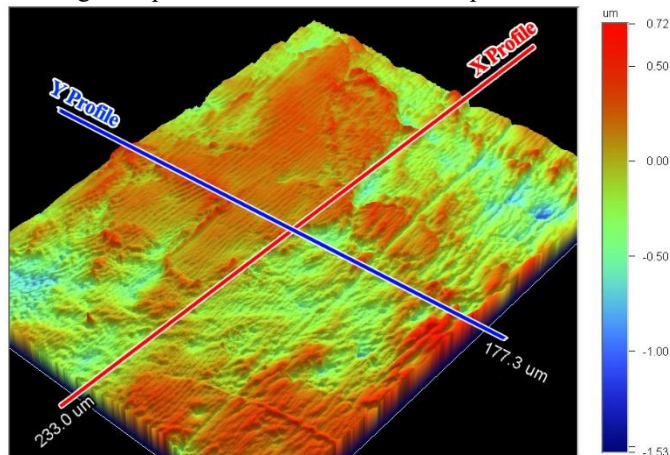


Fig. 8. Topografía de la superficie desarrollada producto de la interacción por cavitación sobre el bronce BrFeNiCrSi 12-7-5-1 con las direcciones según las cuales se realizaron los perfiles de rugosidad.

La evaluación de la formación del micro relieve en el proceso de interacción por cavitación mostró que el indicador de rugosidad Ra luego de 5 minutos de cavitación crece desde 0,020 (en el estado inicial) hasta 0,056, o sea, $\Delta Ra = 0,036 \mu m$, y para el bronce compuesto BrFeNiCrSi 12-7-5-1 desde 0,12 hasta 0,24, $\Delta Ra = 0,12 \mu m$ al tiempo que la resistencia al desgaste del bronce compuesto creció en 4 veces

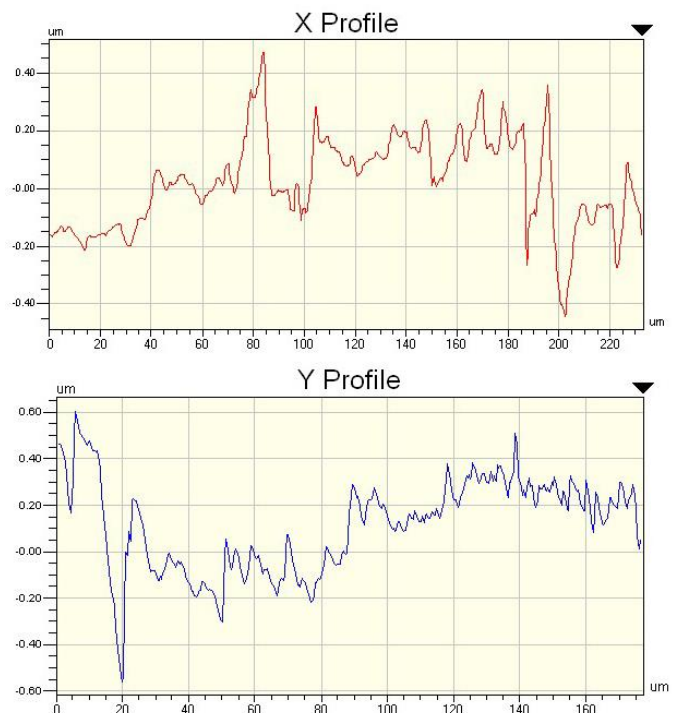


Fig. 9. Perfiles de rugosidad en las direcciones X e Y, mostrados en la figura 3.

En nuestra opinión, la causa de la alta resistencia al desgaste radica en que las dendritas de acero tienen inclusiones blandas de Cu, y en la matriz hay inclusiones dispersas duras de acero [11, 16]. En el proceso de los ensayos tribológicos la interacción hidráulica del aceite forma sobre la superficie de fricción por deslizamiento un micro relieve acumulador de aceite, el cual garantiza una muy alta resistencia al desgaste de los bronce compuestos, particularmente en estado disperso (posiciones 4 y 5 en la tabla V).

Particularmente alta es la resistencia al desgaste del bronce compuesto BrFeNiCrSi 12-7-5-1 (posición 5, tabla V) en el cual las dendritas resultan con la composición de un acero inoxidable Cr23Ni15Si1, “recubiertas” por óxidos duros del tipo $(Fe, Cr)_2O_3$.

Las propiedades mecánicas del bronce compuesto BrFeNiAl 12-7-1 son significativamente superiores que las del bronce BrSn10, particularmente en las propiedades plásticas, incluso en forma de lingotes sin ningún tipo de tratamiento térmico (posición 2 en la tabla VI).

El reemplazo de los compuestos intermetálicos frágiles del tipo Cu_3Sn por aceros de diferentes clases hizo posible obtener bronce compuestos con propiedades mecánicas mejoradas, especialmente si la estructura se dispersa mediante enfriamiento rápido durante la cristalización (ver tabla VI). Esto determina el aumento de las propiedades tecnológicas.

Tabla VI. Propiedades mecánicas de los bronce compuestos después de diferentes tratamientos.

№	Composición del bronce	Régimen de tratamiento	Propiedades mecánicas				
			$\sigma_{0,2}$, MPa	σ_B , MPa	ψ , %	δ , %	δ_P , %
fundición convencional, velocidad de cristalización < 5 °C/s							
1	BrSn10	ninguno	170	215	10-14	3-10	< 1
2	BrFeNiAl 12-7-1	ninguno	170	364	42,8	38,2	20,3
3	BrFeNiAl 12-7-1	temple 950 °C, 30 min, agua	147	300	69,5	66,9	34,2
4	BrFeNiAl 12-7-1	temple + envejecimiento 450 °C, 2 h	149	301	39,4	51,4	39,3
fundición al vacío, velocidad de cristalización > 700 °C/s							
5	BrFeNiAl 12-7-1	ninguno	220	295	38,5	16,0	6,4
6	BrFeNiCrSi 12-7-5-1	ninguno	173	288	14,1	16,9	-

Además, a diferencia del bronce BrSn10, ampliamente utilizado en la construcción de maquinarias, los bronce compuestos se depositan bien sobre el acero y el hierro fundido que son más ecológicos debido a la ausencia de estaño [17].

IV. CONCLUSIONES

Las investigaciones realizadas a nivel de laboratorio fundamentan la racionalidad de crear variantes industriales de bronce compuestos con resistencia al desgaste particularmente alta en las condiciones de fricción por deslizamiento.

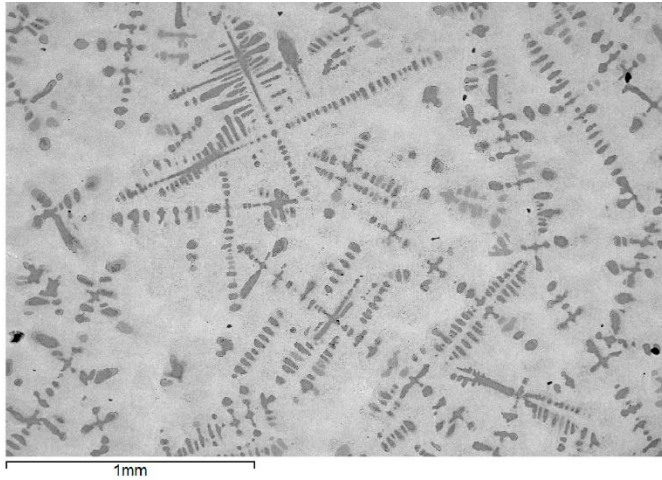
El elevado nivel de las propiedades mecánicas y tecnológicas permite usar los bronce compuestos reforzados por dendritas de acero de diferentes clases tanto en estado fundido como deformado en caliente, o sea, ampliar su área de aplicación en comparación con el bronce “prototipo” BrSn10.

La mejor variante de tales bronce, como mostraron las investigaciones, resultó ser el bronce BrFeNiAl 12-7-1.

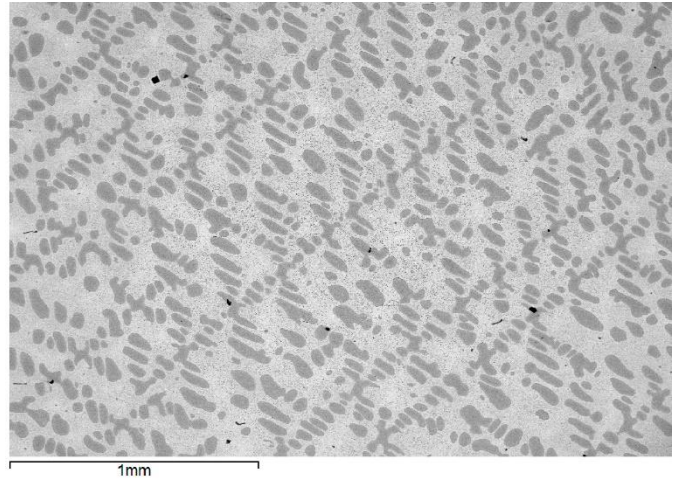
REFERENCIAS

[1] B.N. Arzamasov. Materiales de construcción. Manual. Moscú, Mashinostroenie, 1990. (En ruso)

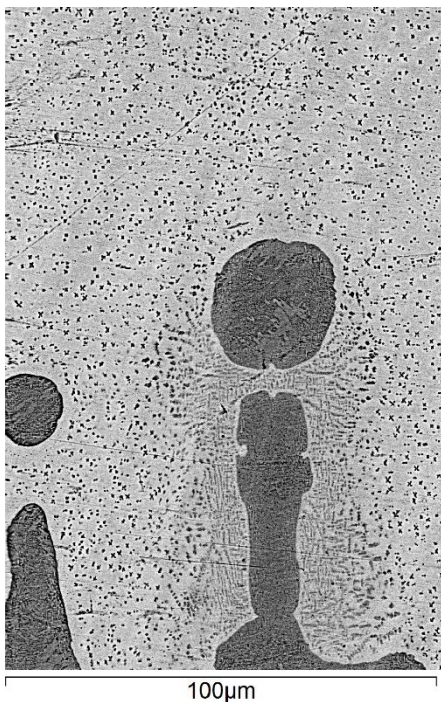
- [2] Y.S. Avramov, A.D. Schliapin. Aleaciones en base de sistema con solubilidad limitada en estado líquido. Moscú, Intercontact Nauka. 2002. (En ruso)
- [3] C.P. Wang, X.J. Liu, I. Ohnuma, R. Kainuma, K. Ishida. Thermodynamic database of the phase diagrams in Cu-Fe base ternary systems. *J. Phase Equilib. Diffus.* Vol 25, No. 4, pp. 320–328, 2004.
- [4] M. Baricco, E. Bosco, G. Acconciaiooco, P. Rizzi, M. Coisson. Rapid solidification of Cu-Fe-Ni alloys. *Mater. Sci. Eng. A.* pp. 375–377, pp. 1019–1023, 2004.
- [5] Y.Y. Chuang, R. Schmid, and Y.A. Chang. Calculation of the equilibrium phase diagrams and the spinodally decomposed structures of the Fe-Cu-Ni system. *Acta Mater.* No. 8, pp. 1369–1380, 1985.
- [6] K.P. Gupta. The Cu-Fe-Ni (Copper-Iron-Nickel) system. *Phase Diagram of Ternary Nickel Alloys.* No. 1, pp. 290–315, 1990.
- [7] S.A. Saltykov. Metalografía estereométrica. Moscú, Metallurgia. 1970. (En ruso)
- [8] B.A. Potekhin, V.V. Iliushin, A.S. Kristoliubov. Propiedades peculiares del babbitt B83 obtenido por el método de fundición turbulenta. *Litió y metalurgia*, 57, No. 3, pp. 78-81, 2010. (En ruso)
- [9] N.P. Liakishev. Diagramas de estado de sistemas metálicos binarios. Manual en tres tomos. Tomo 2. Moscú. Mashinostroenie, 1997. (En ruso).
- [10] Potekhin B.A., Ilyushin V.V., Khristolyubov A.S., Zhilyakov A.Yu, and Ernandes A. Creation of composite bronze – maraging stell alloy. *Metal Science and Heat Treatment*, Vol 55, Nos. 5-6, September, 2013.
- [11] Potekhin B.A., Ilyushin V.V., Khristolyubov A.S., Zhilyakov A.Yu. Formation of structure and properties of composite bronzes reinforced by steel dendrites. *The Physics of Metals and Metallography.* 2014. T. 115. № 4. C. 413-419.
- [12] Y.M. Potak. Acero de alta resistencia, Moscú, Metallurgia, 1972. (En ruso).
- [13] Y.M. Potak, E.A. Sagalevich. Diagrama estructural de aceros inoxidables deformados. *Metallografia y termicheskaya obrabotka metallov.* No. 9, pp. 12-16, 1971. (En ruso)
- [14] E.A. Matsin. Regla de Sharpy y microrelieve de las superficies de las aleaciones antifricción. *Materiales de la Segunda Conferencia de toda la URSS sobre fricción y desgaste en las máquinas.* Moscú. Editorial Academia Nauk USSR, T3, pp. 222-229, 1948. (En ruso)
- [15] B.A. Potekhin, V.V. Iliushin, A.S. Kristoliubov. A.Yu. Shiliakov. Formación de la estructura de los bronce compuestos reforzados con dendritas de acero. *Fizyka Metallov y Metallovedenie.* Tomo 115, No. 4, pp. 442-448, 2014. (En ruso)
- [16] B.A. Potekhin, A.S. Khristolyubov, A.A. Hernandez Ferreira. New class of composite bronze, armed with steel dendrites for antifricction technique. In *Proceedings XXIV International Scientific Conference Trans & Motauto 16 Varna Bulgaria*, vol.1, pp. 36-38, June 2016.
- [17] [V.I. Shumakov et al. Alambre de polvo para la obtención de recubrimientos anti fricción. Patente de Rusia a un modelo útil. №170923 RU. 2017. Boletín № 14. (En ruso)



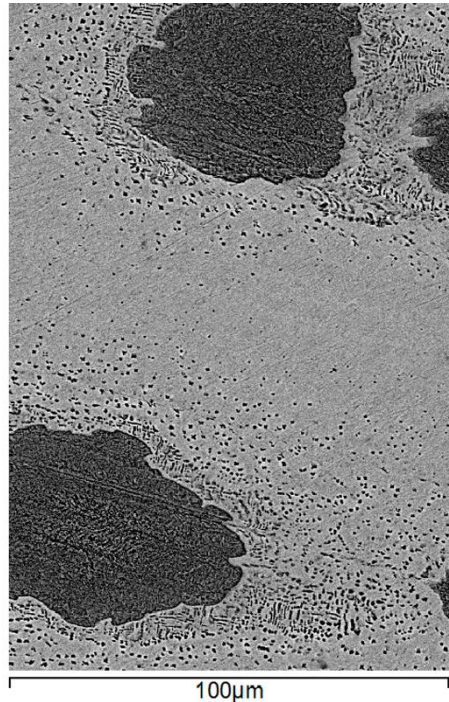
(a)



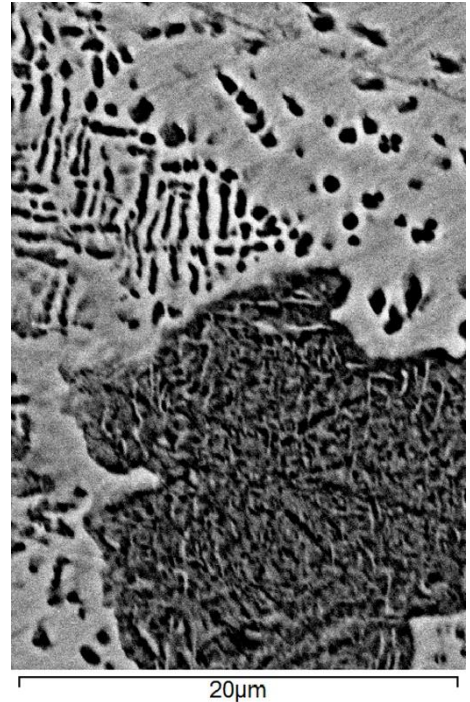
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 1. Particularidades morfológicas de la microestructura de los bronce compuestos en dependencia de la tecnología de su fabricación:

- a) Bronce BrFe14Ni7Sn3Al lingote;
- b) Bronce BrFe23Ni8Co3Al lingote;
- c) Bronce BrFe12Ni7Al lingote;
- d) Bronce BrFe12Ni7Al luego de temple desde 950 °C, 1 hora y envejecimiento a 450 °C, 2 horas.;

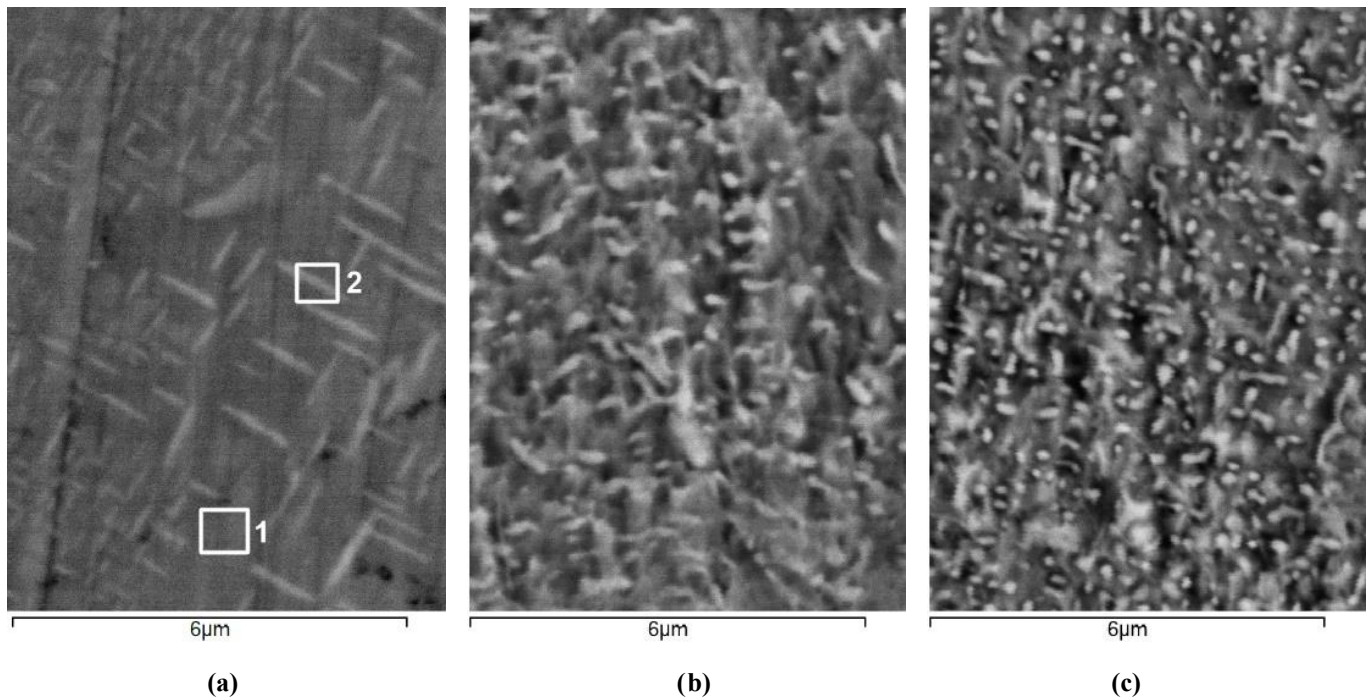
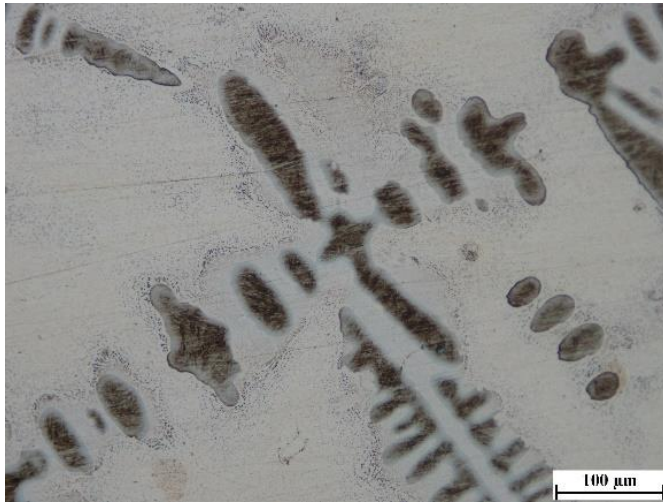


Fig. 3. Estructura interna de la dendrita en bronce tipo BrFeNiCoAl:

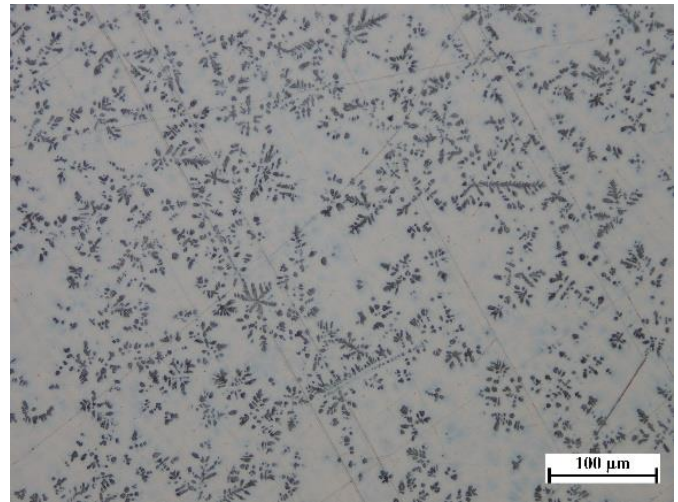
a) lingote (fundido)

b) después de temple desde 950 ° C, 1 hora;

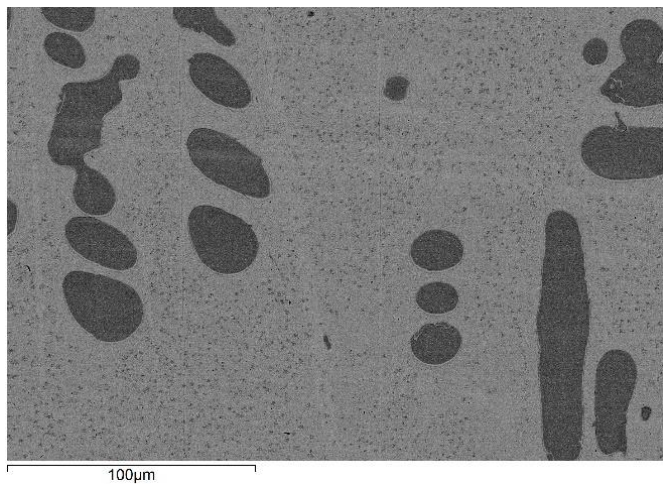
c) después de temple y envejecimiento a 450 ° C, 2 horas.



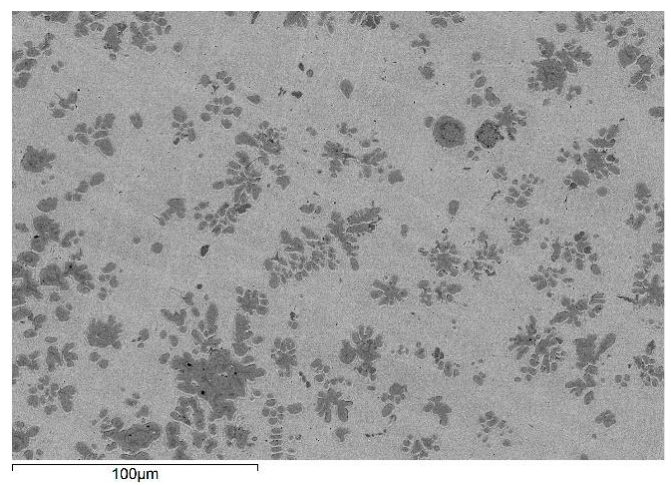
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4. Particularidades morfológicas de la microestructura de los broncees compuestos en dependencia de la tecnología de su fabricación:

- a) Bronce BrFeNiAl 12-7-1, velocidad de cristalización ≤ 5 °C/s;
- b) Bronce BrFeNiAl 12-7-1, velocidad de cristalización > 700 °C/s;
- c) Bronce BrFeNiCrSi 12-7-5-1, velocidad de cristalización ≤ 5 °C/s;
- d) Bronce BrFeNiCrSi 12-7-5-1, velocidad de cristalización > 700 °C/s

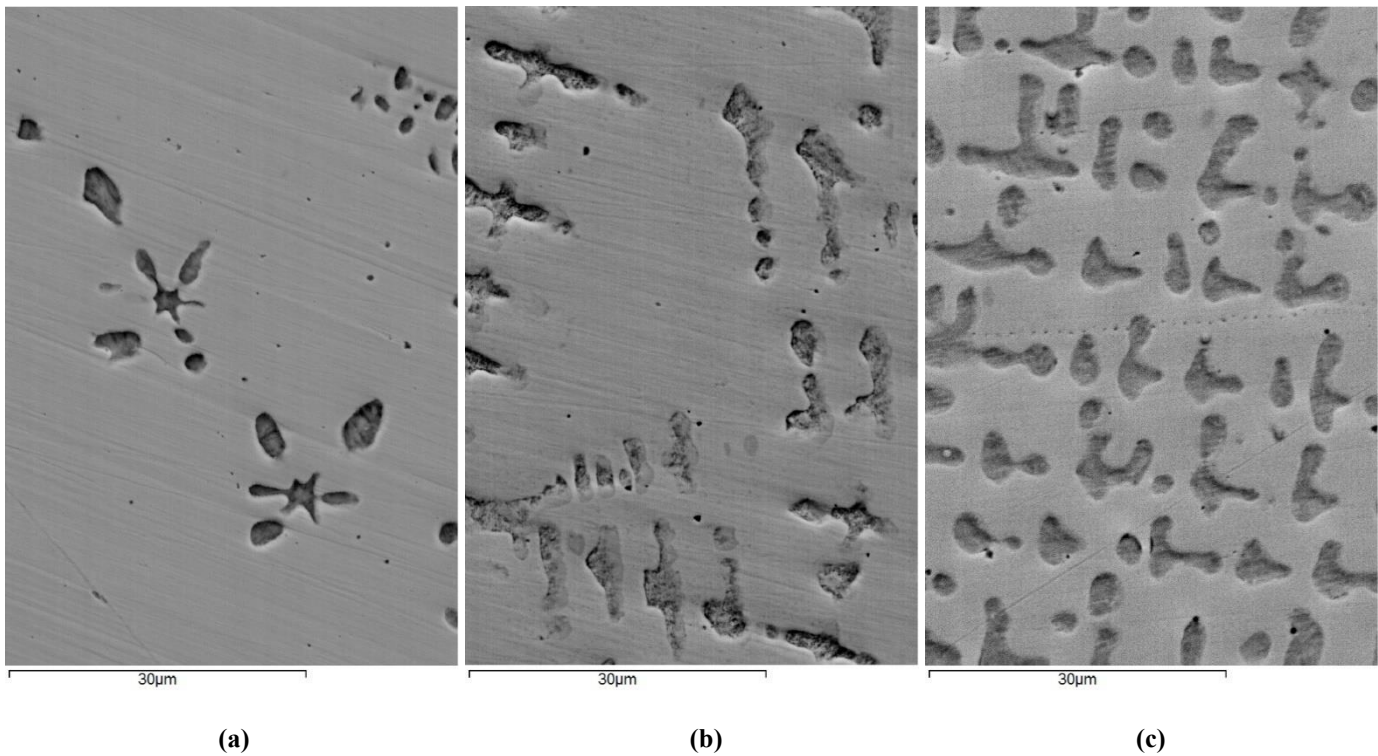


Fig. 6. Efecto del contenido total de elementos de aleación (Σ Fe, Ni, Co,Al) en los bronce de tipo BrFeNiCoAl sobre la cantidad de la fase dendrítica:

- a) Bronce BrFeNiCoAl 9-4-1-1 ($\Sigma = 15\%$), velocidad de cristalización > 700 °C/s
- b) Bronce BrFeNiCoAl 18-8-2-1 ($\Sigma = 29\%$), velocidad de cristalización > 700 °C/s
- c) Bronce BrFeNiCoAl 23-8-3-1 ($\Sigma = 35\%$), velocidad de cristalización > 700 °C/s